

외바퀴 로봇의 외란관측기 기반 제어를 위한 Q필터 시정수 분석

이상덕, 정 슬

지능시스템 및 감성공학 실험실, 메카트로닉스공학과, 충남대학교

Analysis of a Time-constant of Q-filter for Disturbance Observer Based Single-wheel Robot Control

Sang-Deok Lee and Seul Jung

Intelligent Systems & Emotional Engineering(ISEE) Laboratory, Department of Mechatronics Engineering
Chungnam National University, Daejeon, Korea

Abstract - 본 논문에서는 Q-필터의 시정수가 외란관측기의 성능에 어떤 영향을 주는지에 대한 실험 결과를 제시한다. 여기서 외란관측기는 외바퀴 로봇의 균형제어 성능 향상을 목적으로 설계된다. 먼저 외바퀴 로봇의 공칭 모델을 유도하고 역 모델을 구한 다음, 유도된 역 모델의 실현을 위한 Q-필터를 설계한다. 이 때 Q-필터의 시정수는 Q와 (1-Q)의 상보적인 관계가 형성되는 교차점을 결정하게 되는데 이 시정수에 의한 외란관측기의 성능을 실험을 통해 비교 한다. 시정수가 샘플링 주기와 같은 경우, 10배의 샘플링 주기일 경우, 그리고 100배의 샘플링 주기를 갖는 경우에 따른 외바퀴 로봇의 균형제어 성능을 실험 비교한다. 끝으로, 3개의 실험 결과에 따른 로봇의 좌우 롤 각의 차이를 비교 설명한다.

1. 서 론

외란관측기를 이용한 내부 제어 루프의 형성은 모션 제어의 강인성을 향상시켜 준다 [1]. 이 때, 내부 제어 루프는 제어의 대상이 되는 플랜트 모델에 대해 순응하는 특징을 갖게 된다. 그러므로 이러한 제어 구조는 특정 플랜트의 모델 특성을 충분히 반영하여 설계할 수 있는 특징을 갖게 된다. 이러한 이유에서, 외란관측기 기반의 제어 구조를 이용해서 특정 모터에 매칭이 되는 모션 제어기를 제안할 수가 있게 된다.

외란관측기의 설계 과정은 비교적 간단하지만 쉽지 않은 특징을 갖는다. 먼저 제어의 대상이 되는 특정 시스템의 모델이 존재해야만 한다. 이를 공칭 모델이라고 한다. 공칭 모델은 실제 플랜트와 다른 불확실성에 대한 오차를 갖고 있기 때문에 이를 최소화 하거나 또는 이에 대해 보다 강건하게 동작할 수 있는 제어 방법들이 제안되어져 왔다 [2].

공칭 모델이 선정이 된 후에는 이를 실제 제어기에 실현하는 과정을 거치게 된다. 실현 과정에서는 공칭 모델의 역 모델을 사용하게 된다. 이 때, 역 공칭 모델의 전달함수가 실현 가능한 구조가 되기 위해서는 분자의 차수가 분모의 차수보다 작거나 같아야만 한다. 이를 위해서 Q-필터를 설계에 추가하는 과정을 갖게 된다. Q-필터의 설계 인자는 분모의 차수, 분자의 차수, 그리고 시정수가 있다. 분모와 분자의 차수들과 상대적인 차수가 외란관측기 성능에 미치는 영향에 관한 연구들이 제안되었다 [3].

하지만, 시정수에 따른 성능의 영향은 매우 복잡한 관계들을 갖고 있으므로 정확한 시정수의 설계 값을 제안하는 것은 쉽지 않은 일임에 틀림없다. Q-필터의 시정수는 샘플링 시간과 플랜트의 고유진동수 사이에서 결정하게 된다. 이 때, 플랜트의 파라미터를 알 수 없는 경우나 시스템의 동적 상태에 따른 파라미터의 변화 등이 예상되어지는 경우에는 Q-필터의 시정수의 상한치를 설계하는 데에는 어려움이 따르게 된다. 그러므로 실제적인 설계 기준으로는 하한치에 해당하는 샘플링 시간만이 존재하게 된다.

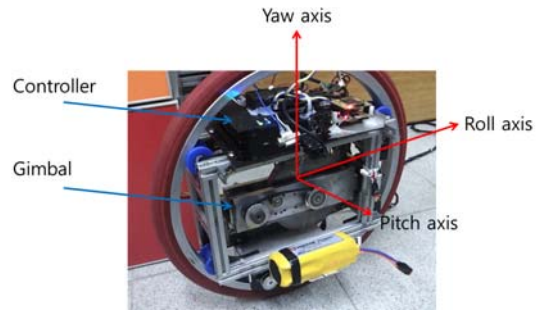
시정수는 Q-필터의 Q 특성과 (1-Q)의 특성을 결정하는 교차점을 형성하는 특징을 갖고 있다. Q-필터의 차단주파수까지의 대역폭이 클 경우에는 외란에 대한 억제 성능이 향상되지만 센서 잡음에 대한 내성 성능은 저하되는 특징을 갖고 있다. 이와 반대로 Q-필터의 차단주파수까지의 대역폭이 작을 경우에는 센서 잡음에 대한 내성 성능은 향상되지만 외란에 대한 억제 성능은 저하되는 특징을 갖게 된다. 이 때 Q-필터의 대역폭은 시정수의 값에 의해 결정된다. 그러므로 외란관측기 기반의 제어기 설계에 있어서 Q-필터의 시정수는 시스템의 전반적인 제어 성능에 미치는 영향이 매우 크다고 할 수가 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저, 외바퀴 로봇의 공칭 모델을 유도한다. 본 논문에서는 역 스틱 모델을 기반으로 간략화 된 외바퀴 로봇의 공칭 모델을 유도한다. 다음으로, Q-필터를 설계한다. Q-필터는 Tomizuka 설계 방법에 의해 Q31 필터로 설계한다. 다음으로, 설계된 외란관측기를 실제 DSP에 탑재한 다음 실험을 진행한다. 실험 과정에서, 3개의 서로 다른 시정수를 사용했을 때를 비교 실험한다. 샘플링 주기와 같은 시정수를 사용했을 경우, 10배의 샘플링 주기에 해당하는 시정수를 사용했을 경우, 그리고 100배의 샘플링 주기에 해당하는 시정수를 사용했을 경우를 각각 비교한다. 끝으로, 시정수에 의한 제어 성능 변화를 비교 분석한다. 비교 방법으로는 로봇의 좌우 균형에 해당하는 롤 각과, 김벌시스템에 있는 플라이휠의 틸트 각, 그리고 각각 관측된 외란에 대한 비교 플랫폼을 제시하고 이에 따른 외란관측기의 성능의 차이를 설명한다.

2. 본 론

2.1 시스템

외바퀴 로봇은 내부 김벌시스템에 의해서 로봇의 좌우 균형 제어, 조향 제어, 그리고 김벌시스템 자체의 제어와 같은 세 가지 제어를 동시에 수행해야하는 로봇 시스템이다. 본 논문에서는 로봇의 좌우 균형은 롤 각, 조향은 요 각, 그리고 김벌시스템의 회전은 틸트 각이라고 정한다. 외바퀴 로봇의 형상은 그림 1과 같다.



〈그림 1〉 외바퀴 로봇 형상

2.2 모델링

외바퀴 로봇의 다이내믹 모델은 롤 방향에 대해 불안정한 구조를 갖는 역 진자 또는 역 스틱 모델을 이용해서 라그랑지안 방법으로 유도할 수 있다. 유도된 모델은 (1)과 같다.

$$u(t) = J\ddot{\theta}(t) - \frac{1}{2}MgL\theta(t) \quad (1)$$

(1)에서 J는 로봇의 관성 질량이고, M은 로봇의 무게이고, g는 중력가속도이고, L은 로봇의 지름이고, $\theta(t)$ 는 롤 각도이고, u(t)는 입력 토크이다. 즉, 로봇시스템은 제어기에 의해 생성된 토크를 시스템의 입력으로 하고 로봇의 롤 각도를 출력으로 하는 시스템이라고 볼 수 있다. (1)로부터 시스템 모델의 전달함수를 구하게 되면 (2)와 같게 된다.

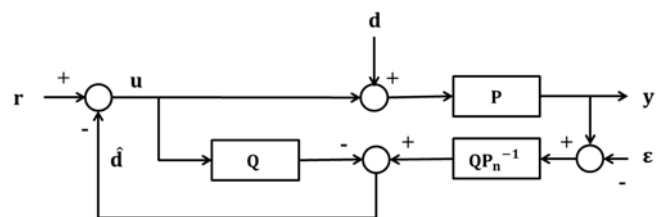
$$P_n(s) = \frac{V(s)}{U(s)} = \frac{1}{Js^2 - \frac{1}{2}MgL} \quad (2)$$

(2)에서 로봇의 관성질량은 $0.3(\text{kgm}^2)$ 이고, 질량은 $1.2(\text{kg})$ 이고, 지름은 $0.5(\text{m})$ 이다. 이 값들을 대입해서 정리하면 (2)는 (3)과 같이 쓸 수 있다.

$$P_n(s) = \frac{V(s)}{U(s)} = \frac{1}{0.3s^2 - 2.94} \quad (3)$$

2.3 외란관측기 설계

외란관측기의 전형적인 구조는 그림 2와 같다.



〈그림 2〉 전형적인 외란관측기 구조

그림에서 r은 제어 명령이고, u는 외란 보상이 된 제어 입력이고, d는

외란이고, \hat{d} 는 추정 외란이고, P는 플랜트이고, Q는 필터이고, QP_n^{-1} 는 역모델이 결합된 필터이고, y는 출력이고, ε 은 센서 노이즈이다. 제시된 구조에서 시스템은 3개의 입력과 하나의 출력을 갖는 MISO(Multi Input Single Output) 형태가 됨을 알 수가 있다. 이 때, 외란 관측기의 두 가지 대표적인 성능인 외란 억제 성능과 센서 잡음 내성의 특성은 전달함수를 통해서 파악할 수 있게 된다.

$$G_{dy}(s) = (1-Q(s))P(s) \quad (4)$$

$$G_{eu}(s) = Q(s)P(s)^{-1} \quad (5)$$

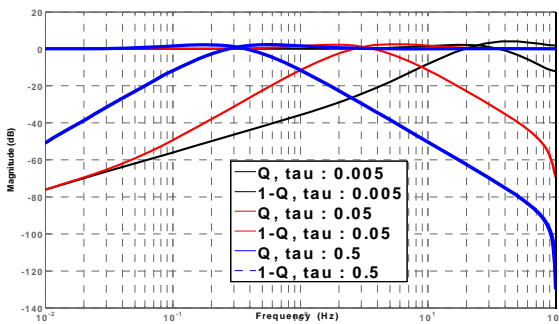
(4)에서 보면 (1-Q)의 대역폭이 작고 그 주파수 응답의 크기가 작을수록 외란에 대한 억제 성능이 좋아짐을 알 수 있다. (5)에서 보면 Q의 대역폭이 작고 그 주파수 응답의 크기가 작을수록 센싱 잡음 내성이 좋아짐을 알 수가 있다. 그러므로 Q와 (1-Q)는 외란 억제 성능과 센싱 잡음 내성에서 서로 상보적인 관계를 갖고 있음을 알 수가 있다. 이 때, Q-필터의 시정수는 대역폭을 조절하는 역할을 하는 설계 파라미터가 되고 Q-필터를 구성하는 전달함수의 형태는 그 주파수 응답의 크기를 조절하는 역할을 각각 하게 된다. 만약 Q-필터의 형태가 Q20 이나 Q31 이나 Q42와 같이 하나의 형태로 고정된 상태에서는 그 주파수 응답의 크기를 조절할 수는 없고 시정수를 이용한 대역폭의 조절만이 가능하게 된다. 또한 그 반대의 경우도 가능하다. 본 논문에서는 Q-31로 필터 형태를 고정된 상태에서 대역폭에 따른 외란관측기의 성능을 확인하고자 한다.

먼저 Q31 필터는 다음과 같다 [2].

$$Q_{31} = \frac{3(\tau s) + 1}{(\tau s)^3 + 3(\tau s)^2 + 3(\tau s) + 1} \quad (6)$$

(6)에서 볼 수 있는 것처럼 필터의 형태가 고정된 다음에 사용할 수 있는 설계 인자는 시정수가 전부이다. 여기서 시정수는 앞서 언급한 바와 같이 외란관측기의 대표적인 두 개의 상보적인 성능들을 조절하는 역할을 하게 된다. 시정수는 샘플링 시간보다 빠르게 선정할 수 없기 때문에 샘플링 시간은 시정수 설계에 있어서 설계 최소치에 해당하게 된다. 또한, 시정수는 시스템의 지연에 해당하기 때문에 플랜트의 고유진동주기보다는 작은 값을 사용해야만 한다. 하지만, 공칭 모델은 실제 모델과는 다르며 또한 동적인 상태에서 모델의 파라미터는 변하게 될 수 있기 때문에 고유진동수의 정확한 값을 알아내기는 결코 쉬운 일이 아니다. 그러므로 실제적인 설계 기준은 설계 최소치에 해당하는 샘플링 주기를 이용하는 것이 바람직하다고 볼 수 있다. 본 논문에서 샘플링 주기 T_s 는 5ms 이다.

앞서 설계된 Q-필터에서 Q와 (1-Q) 특성은 그림 3과 같다. 그림에서 보면 시정수의 크기가 작을수록 그림의 X축으로 큰 값에 Q와 (1-Q)의 교차점이 생기는 것을 확인할 수가 있다. 반대로 시정수의 크기가 커질수록 교차점의 위치는 그림의 X축에서 작은 값에서 발생할 수 있다. 즉 시정수의 크기가 작을수록 Q의 대역폭은 커지기 때문에 외란에 대한 억제 능력은 향상이 되지만 센서 잡음 억제 대역폭은 작아지게 된다. 그러므로, 외란관측기의 외란 억제 성능을 최우선으로 하는 설계에서는 Q의 대역폭을 최대화 하는 것이 바람직하다고 볼 수 있다. 그러나 이 경우 센서에 의한 고주파 잡음의 영향이 커지는 단점이 발생하게 된다.



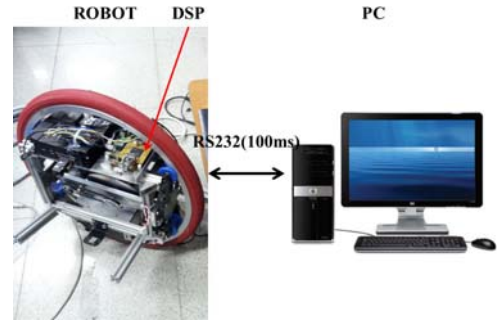
<그림 3 시정수에 따른 Q-필터 특성>

2.4 실험 분석

외란관측기의 설계 과정에서 시정수의 선택은 보다 실증적인 분석을 통해서 특정 시스템에 맞는 설계치를 찾는 노력이 필요하게 된다. 본 논문에서는 이러한 관점에서 실증 실험 분석을 통해 시정수의 영향을 다시 한 번 확인하고자 한다. 그림 4는 실험 환경이다.

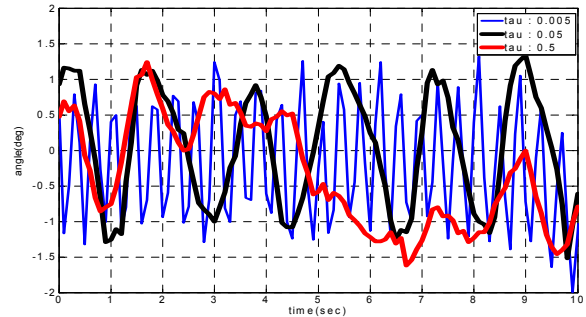
실험방법은 다음과 같다. 먼저 제시된 3개의 시정수 가운데 어떤 시정수를 갖는 외란관측기를 이용한 로봇의 실제 균형제어를 수행하도록 한다. 다음으로 분석에 필요한 데이터를 DSP로부터 RS232 통신을 이용해서 100ms 마다 PC로 전송하도록 한다. 그리고 또 다른 시정수를 탑재한 외란 관측기를 이용하여 같은 실험을 진행한다. 이렇게 총 3개의 서로 다른 시정수가 탑재된 상태에서 실제 균형제어를 수행하도록 한 다음 취득된 데이터를 비교

하는 방식으로 진행한다. 외란관측기는 균형제어기가 아니므로 제어기의 외부 루프에는 비례분제어기를 사용하고 3개의 실험에서 각각 같은 게인 값을 적용토록 한다.



<그림 4 실험 환경>

그림 5에서 보면 시정수가 5ms 경우 바디의 롤 각이 시간에 대해 매우 빠르게 흔들리는 모습을 볼 수가 있다. 이 경우 로봇은 심한 진동을 일으키기 되면서 균형제어의 연속성이 보장되지 못하는 단점이 발생한다. 시정수가 500ms 인 경우를 보면 신호의 형태가 정현파의 형태를 제대로 갖추지 못하는 문제가 발생한다. 즉 제어 신호의 지연이 발생하는 문제가 발생하게 된다. 본 실험에서는 50ms에서 실험가능할만한 결과를 확인할 수가 있다. 균형제어 롤 각도가 일정한 진폭과 주기를 갖는 정현파의 형태를 나타내고 있기 때문이다.



<그림 5 롤 각>

3. 결 론

본 논문에서는 외란관측기 기반의 외바퀴 균형제어 방법을 제안하였고 외란관측기의 설계에 있어서 Q-필터의 시정수가 어떤 영향을 주는지를 실험 검증을 통해 비교 결과를 제시하였다. 제시했던 실험 결과로는 시정수가 샘플링주기의 수십 배 영역에서 수 배 또는 수백 배 보다 상대적으로 좋은 성능을 보여주었다. 또한, 외바퀴 로봇의 경우 센서로 인한 고주파 잡음의 영향이 매우 크다는 점을 확인할 수가 있었다. 시정수를 샘플링 주기와 같은 값으로 선정했을 경우 센싱 고주파 잡음에 의한 영향으로 제어 입력이 포화되고 채터링이 발생하게 된다는 것을 알 수 있었다. 그러므로 민감한 센서가 장착된 시스템에서의 외란관측기 설계는 시정수 값을 선정하는데 있어서 보다 신중할 필요성이 있다. 실험적인 결과를 바탕으로 선택된 시정수 값은 상대적으로 적절한 수준에서 외란 억제 성능과 센싱 잡음 내성의 특성을 보여줄 수가 있었고 이를 통해 외란관측기 기반의 외바퀴 로봇 균형제어가 실험가능함을 확인할 수가 있었다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 논문은 2014년 한국연구재단 기초연구의 지원을 받아 수행 되었으며 이에 감사드립니다(NRF-2014R1A21A11049503).

[참 고 문 헌]

[1] K. Ohnishi, M. Shibata, and T. Murakami, "Motion control for advanced mechatronics", *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, vol.1, no. 1, pp. 56-67, 1996.
 [2] K. Kong and M. Tomizuka, "Nominal model manipulation for enhancement of stability robustness for disturbance observer-based systems," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 11, no. 1, pp. 12-20, 2013.
 [3] Y. Choi, K. Yang, W. K. Chung, H. R. Kim, and I. H. Suh, "On the robustness and performance of disturbance observers for second-order systems," *IEEE Trans. of Automatic Control*, vol. 48, no. 2, pp. 315-320, 2003.